



UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Nika ŠVIGELJ

**UPORABA RAČUNALNIŠKIH ORODIJ ZA OCENJEVANJE
IZPIRANJA FITOFARMACEVTSKIH SREDSTEV**

DIPLOMSKI PROJEKT

Univerzitetni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2010

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Nika ŠVIGELJ

**UPORABA RAČUNALNIŠKIH ORODIJ ZA OCENJEVANJE
IZPIRANJA FITOFARMACEVTSKIH SREDSTEV**

DIPLOMSKI PROJEKT
Univerzitetni študij - 1. stopnja

**USAGE OF COMPUTER TOOLS FOR PREDICTING PESTICIDE
LEACHING**

B. SC. THESIS
Academic Study Programmes

Ljubljana, 2010

Diplomski projekt je zaključek Univerzitetnega študija Kmetijstvo – agronomija – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za pedologijo in varstvo okolja

Študijska komisija Oddelka za agronomijo je za mentorja diplomskega dela imenovala prof. doc. dr. Marjetko Suhadolc.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Borut Bohanec
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za agronomijo

Član: doc. dr. Marjetka Suhadolc
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za agronomijo

Član: izr. prof. dr. Franci Aco Celar
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za agronomijo

Datum zagovora: 8.10.2010

Diplomski projekt je rezultat lastnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega diplomskega projekta na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je delo, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identično tiskani verziji.

Nika Švigelj

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Du1
- DK UDK 632.95: 631.432.33: 681.3 (043.2)
- KG fitofarmacevtska sredstva/izpiranje/podzemne vode/modeliranje
- AV ŠVIGELJ, Nika
- SA SUHADOLC, Marjetka (mentor)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo
- LI 2010
- IN UPORABA RAČUNALNIŠKIH ORODIJ ZA OCENJEVANJE IZPIRANJA
FITOFARMACEVTSKIH SREDSTEV
- TD Diplomski projekt (Univerzitetni študij - 1. stopnja)
- OP V, 16 str., 3 preg., 4 sl., 17 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI V diplomskem projektu so predstavljeni računalniški modeli in orodja, s pomočjo katerih lahko ocenjujemo izpiranje fitofarmacevtskih sredstev (FFS) v podtalnice. Računalniški modeli upoštevajo tako lastnosti FFS kot tudi lastnosti okolja, t.j. podnebnih in geološko-hidroloških razmer, lastnosti tal, ter vegetacije. Prvenstveno se uporabljajo deterministični in empirični modeli, ki so v široki rabi za raziskovalne namene in za registracijske postopke. Za registracijo FFS se v EU uporabljajo MACRO, PEARL, PELMO in PRZM in sicer za 9 FOCUS okoljskih scenarijev. Razvoj računalniških orodij poteka v smer poenostavljanja in zagotavljanja večje splošne uporabnosti, s čim manjšimi napakami rezultata.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Du1

DC UDC 632.95: 631.432.33: 681.3 (043.2)

CX pesticides/leaching/groundwater/modelling

AU ŠVIGELJ, Nika

AA SUHADOLC, Marjetka (supervisor)

PP SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Agronomy

PY 2010

TY USAGE OF COMPUTER TOOLS FOR PREDICTING PESTICIDE LEACHING

DT B. Sc. Thesis (Academic Study Programmes)

NO V, 16 p., 3 tab., 4 fig., 17 ref.

LA sl

Al sl/en

AB In the thesis computer models and tools for pesticide groundwater risk assessment are introduced. Models consider pesticide properties as well as environmental conditions such as climate and hydro-geological properties, soil properties and vegetation. Deterministic and empirical fate models are widely used for research and registration purposes. Results of the models MACRO, PEARL, PELMO and PRZM for 9 FOCUS scenarios are accepted for pesticide registration procedures in the EU. The development of computer tools for pesticide groundwater risk assessment goes into the direction of making complex and demanding models more user friendly with simplification approaches with as little errors as possible.

KAZALO VSEBINE

	KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	II
	KEY WORDS DOKUMENTATION.....	III
	KAZALO VSEBINE.....	IV
	KAZALO PREGLEDNIC.....	V
	KAZALO SLIK.....	V
	OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	V
1	UVOD.....	1
1.1	USODA FFS.....	1
1.2	PRENOSI FFS V OKOLJE.....	3
2	METODE ZA OCENJEVANJE IZPIRANJA FFS.....	4
2.1	VIRI ZA PREDVIDENJE NAPAK PRI MODELIRANJU.....	5
2.2	METODE NA OSNOVI INDEKSA	5
2.3	SIMULACIJSKI MODELI.....	7
2.3.1	Pedotransferne funkcije.....	8
2.3.2	Poznani simulacijski modeli.....	8
2.3.3	Model PELMO za ocenjevanje izpiranja FFS.....	9
2.3.4	Model MACRO za ocenjevanje izpiranja FFS.....	10
2.3.5	Prednosti in slabosti simulacijskih modelov.....	11
2.4	META MODELI.....	11
2.4.1	MACRO.....	12
2.4.2	FOOTPRINT.....	12
3	ZAKLJUČEK.....	14
4	VIRI.....	15

KAZALO PREGLEDNIC

	Str.
Preglednica 1: Klasifikacija mobilnosti (FAO, 2000).....	2
Preglednica 2: Klasifikacija razgradnje (FAO, 2000).....	2
Preglednica 3: Vhodni podatki za modeliranje – standardni FOCUS scenarij (Azimonti, 2006).....	9

KAZALO SLIK

	Str.
Slika 1: Shematski prikaz virov napak v modelnem napovedovanju (Stenemo, 2007).....	5
Slika 2: Shema razvrščanja, ki je bila uporabljena za oceno tveganja izpiranja FFS na območju Havajskega otočja (Stenemo, 2007).....	6
Slika 3: Karta ranljivosti tal glede tveganja za izpiranje izbranega FFS na otoku O`Alu (Stenemo, 2007).....	7
Slika 4: Primerjava merjenih (lizimetri) in izračunanih (PELMO) kumulativnih količin izprane vode skozi talni profil (L/m^2) (Klein in sod., 1997)	10

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

FFS	fitofarmacevtska sredstva
EU	Evropska unija
L	liter
m	meter

1 UVOD

Fitofarmaceutska sredstva so po definiciji sintetične ali naravne snovi, ki varujejo rastline pred škodljivimi organizmi (Milevoj, 2007).

Uporaba fitofarmaceutskih sredstev (FFS) je dandanes nujna za konkurenčno in ekonomsko upravičeno pridelavo rastlin. Vendar pa, ko FFS dosežejo svoj zelen učinek na rastlinah, lahko njihovi ostanki obremenijo okolje, tudi z možnimi negativnimi posledicami za žive organizme.

Usoda FFS v okolju je odvisna od fizikalno kemijskih lastnosti pripravka, tehnike nanosa FFS, podnebnih značilnosti območja, fizikalno kemijskih in bioloških lastnosti tal, vegetacije ter načina rabe tal. Neustrezna raba FFS lahko pripelje do onesnaženja zraka, tal, površinskih in podzemnih vodnih virov.

Večja uporaba FFS v splošnem pomeni tudi večje tveganje za okolje, zato je vedno več raziskav usmerjenih v zmanjševanje potencialnih negativnih vplivov uporabe FFS. Laboratorijski in poljski preizkusi preučevanja usode FFS so se pokazali kot časovno in finančno zelo zahtevni, zato raziskovalci v zadnjem času veliko pozornosti namenjajo razvijanju računalniških modelov, ki s simulacijami napovedujejo obnašanje FFS v okolju. Poznamo modele za (i) ocenjevanje izpiranja FFS skozi talni profil, (ii) ocenjevanje izhlapevanja FFS s površine tal, (iii) ter ocenjevanje površinskega odtoka FFS. Na trgu je veliko modelov, ki so v široki rabi za raziskovalne namene in za registracijske postopke FFS (Dubus in Surdryk, 2006).

1.1 USODA FFS

Po nanosu FFS na polje, ko doseže zelen učinek na ciljne organizme, njegovo nadaljno usodo v okolju v splošnem določajo številni in medsebojno povezani procesi v tleh. Glavni procesi FFS v okolje so: izhlapevanje v zrak, transport z gibanjem vode v tleh, prenos v organizme, vezanje na talne delce, različne transformacije in razgradnje (Suhadolc in Lobnik, 2007). Za usodo FFS v okolju sta predvsem bistvena procesa sorpcije in razgradnje.

Adsorpcija FFS na talne delce, prvenstveno na glinene minerale in organsko snov tal, zadržuje gibanje FFS v talnem profilu in s tem povečuje razpoložljiv čas za razgradnjo. Vendarle pa zmanjšana dostopnost FFS mikroorganizmom (z večjo sorpcijo) istočasno zmanjšuje stopnjo njegove razgradnje. Sorpcija nepolarnih FFS (delež polarnih je relativno majhen) je odvisna predvsem od vsebnosti organske snovi tal, z izjemo tal z majhnim deležem organske snovi, na primer v spodnjih horizontih. Sorpcijske vrednosti za določen FFS so višje v tleh z višjo vsebnostjo organske snovi tal. Nevarnost za prehod FFS v podtalnico je večja, če je vsebnost organske snovi v tleh manjša.

Za merilo sorpcije FFS uporabljamo porazdelitveni koeficient K_{OC} , ki je definiran kot razmerje med koncentracijo adsorptivno vezanega FFS in koncentracijo FFS v talni vodi. To pomeni, za določeno količino FFS; manjši kot je koeficient K_{OC} , večja je koncentracija

FFS v talni raztopini. FFS z nizkim koeficientom K_{OC} imajo večjo nagnjenost k izpiranju, kot tisti z visoko vrednostjo K_{OC} (FAO, 2000) (preglednica 1).

Preglednica 1: Klasifikacija mobilnosti

Log K_{oc}	Klasifikacija
< 1	zelo mobilno
1 – 2	mobilno
2 – 3	zmerno mobilno
3 – 4	komaj mobilno
> 5	nemobilno

Pomembna lastnost FFS, ki tudi vpliva na izpiranje, je njihova topnost v vodi. Topnost v vodi je podana z vrednostjo mg/L pri 20°C. FFS z visoko topnostjo v vodi predstavljajo veliko tveganje za prenos v podtalnico.

Razgradnja je eden najbolj zaželenih procesov v usodi FFS, saj zmanjšuje količino FFS v tleh. V končni stopnji razgradnje FFS pride do sproščanja ogljikovega dioksida in nastanka drugih enostavnih anorganskih molekul CO_2 , H_2O , HCl , SO_2 . Na razgradnjo FFS vplivajo lastnosti tal, lastnosti FFS in klimatski dejavniki. Med lastnostmi tal imajo pomembno vlogo količina organske snovi, tekstura, pH ter mikroba aktivnost.

Razgradnja je lahko biološka, kemična in fotokemična. Z besedo biološka razgradnja označujemo transformacijo snovi s pomočjo mikroorganizmov. Pod različnimi okoljskimi pogoji je lahko biološka razgradnja odvisna od številnih faktorjev vključno s prisotnostjo kisika v tleh (aerobni/anaerobni pogoji), vsebnostjo hranil, velikosti populacije določenih mikroorganizmov in prilagoditvenih možnosti mikroorganizmov. Pri fotokemični razgradnji poteka proces fotolize. FFS je izpostavljen sončnemu sevanju in se pod vplivom sevanja razgrajuje. Pri kemični razgradnji FFS razpade s pomočjo zraka, vode in ostalih snovi v tleh in rastlinah. Proces, ki potekajo so oksidacija, redukcija in hidroliza. Proces hidrolize povzroča ločevanje komponent FFS ob stiku z vodo. Pri hidrolizi se s pomočjo kemične reakcije pri kateri se del komponente FFS, ki reagira z vodo nadomesti z OH skupino. Ta proces je močno odvisen od kislosti tal (pH vrednost).

Čas razgradnje izražamo z razpolovno dobo (DT_{50}), ki je definirana kot čas, ki je potreben, da se razgradi polovica FFS. FFS, ki imajo vrednost DT_{50} večjo kot 30 dni imajo v splošnem večji potencial za izpiranje. V splošnem se stopnja razgradnje zmanjšuje sorazmerno z globino tal, skozi katero se prenaša FFS. Vzrok temu so manj ugodni pogoji za mikroorganizme v globljih horizontih. Snovi, ki so podvržene zelo dolgotrajnemu razgrajevanju imenujemo obstojne (perisistentne).

Preglednica 2 : Klasifikacija razgradnje

DT_{50}	Klasifikacija
< 20	takoj razgradljivo
20 – 60	dokaj razgradljivo
60 – 180	rahlo razgradljivo
> 180	težko razgradljivo

Hitrost prenosa FFS skozi talni profil je nadalje odvisna od količine padavin v obdobju uporabe FFS. Hiter prenos skozi talni profil je značilen za tla z večjim deležem makropor, kjer se FFS prenaša hitro z gravitacijsko vodo. Nasprotno, uporaba FFS v bolj sušnih obdobjih zmanjšuje tveganje hitrega izpiranja v podtalnico.

1.2 PRENOSI FFS V OKOLJU

Procesi prenosa FFS z mesta vnosa v okolje so: zanašanje FFS (drift), izhlapevanje FFS s talne površine, gibanje z vodo oziroma talnimi delci (površinski odtok in erozija, lateralni tokovi, izpiranje).

Površinsko odtekanje in erozija

Površinsko odtekanje se pojavlja na skoraj vseh površinah, kjer uporabljamo FFS. Pogostost pojava je odvisna od podnebnih razmer. Ločimo dva načina površinskega odtekanja. Prvi, takoimenovani »Hortonianov« površinski odtok oz. presežek infiltracijske sposobnosti tal (Jarvis, 1995), se pojavi, ko je zaradi obilnih padavin infiltracijska sposobnost presežena, kar pomeni, da se voda v tla ne vpija dovolj hitro in zato le ta odteče. Druga oblika odtekanja pa se pojavi, ko so tla v stanju nasičenja z vodo. To v praksi pomeni, da vsaka kaplja dežja takoj odteče in se ne vpije v zemljo. Ta pojav je pogost v hribovitih območjih, kjer k površinskemu odtekanju vode pripomore tudi pobočje.

Izguba oziroma površinsko odtekanje FFS se smatra za mnogo bolj pomembno kot pa erozija, saj je erozija v veliki večini primerov relativno majhna v primerjavi s površinskim odtekanjem voda.

Lateralni tokovi

Zaradi lateralnega gibanja vode, na primer nad manj prepustnimi horizonti, se lahko pojavljajo velike koncentracije FFS v potokih in jarkih ob poljih. Glavni razlog za veliko koncentracijo je prehitro prehajanje FFS skozi vrhno plast tal, kjer sta razgradnja in sorpcija največji. FFS se tako v tleh zadržijo premalo časa za učinkovito razgradnjo.

Do lateralnih prenosov prihaja tudi zaradi umetnih drenažnih sistemov, to je podpovršinskih odtokov, ki so namenjeni odvajanju vode z zgornjih plasti tal.

Izpiranje

Izpiranje skozi tla je vertikalni prenos snovi skozi talni profil, preko nenasičene cone in končno v podtalnico. Izpiranje je značilno za tla z zelo majhno sposobnostjo vezave FFS (sorpcije), območja z veliko količino padavin in nizkimi temperaturami. Pomembna dejavnika sta tudi globina tal in nivo podtalnice. Ukrepov za omejitvev izpiranja FFS v podtalnico je več. Med FFS izbiramo tista s kratko razpolovno dobo in večjo sorpcijsko vrednostjo.

Raziskave so pokazale, da so preferenčni tokovi, na primer tok gravitacijske vode skozi makropore, eden glavnih razlogov za prenos FFS v podtalnico (Kladivko in sod., 1991). Za preferenčni tok je značilno, da se voda in topljenec hitro premikata v določeni smeri, pri čemer obideta porozno matrico.

Zanašanje FFS (*drift*)

Vnašanje FFS v okolje se navadno izvršuje s škropljenjem. Velikokrat se dogaja, da ves FFS ne ostane na mestu, kjer si ga želimo ampak se s pomočjo vetrov in drugih meteoroloških pojavov razpršuje po širšem območju. Večja verjetnost zanašanja je ob škropljenju rastlin, manjša pa ob škropljenju neporaslih tal. Za razliko od prej navedenih vzorcev pronicanja zanašanja ni odvisno od vrste FFS, temveč od načina uporabe, vrste rastline, vremenskih pogojev. Vlade so v zadnjih letih namenile največ pozornosti zanašanju FFS, zato so posledice in procesi najbolj raziskani (Reichenberger in sod., 2006).

Ostali difuzni viri

Eden od ostalih virov onesnaževanja s FFS je atmosferski transport FFS. Lahko se dogaja, da veter odnaša delce zemlje prepojene s FFS. To zemljo veter potem odlaga v bližini vodnih zajetij in tako onesnažuje podtalnico. Drug način pa je izhlapevanje FFS. Izhlapeli FFS se seli z vetrom in nalaga ob vodnih virih. Za preprečevanje tega pojava se uporabljajo sredstva za omejevanje premikanja zraka kot so protivetrne ograje ali talnapokrivala.

Točkovni viri

Točkovni viri so posledica odtekanja in izpiranja FFS z dvorišč kmetij, skladiščnih prostorov in cest. Če kmetijsko poslopje ni priključeno na kanalizacijski vod ali pa ob mejah ni infiltracijske cone se bo FFS spral v najbližji odtok, če pa kmetija je priključena na kanalizacijo pa se bo FFS znašel na poti skozi čistilno napravo. Od tam se bo FFS vrnilo nazaj v naravo (Reichenberger in sod., 2006).

2 METODE ZA OCENJEVANJE IZPIRANJA FFS

Razvoj za ocenjevanje izpiranja modelov sega v sredino 80-let. Do danes je razvoj modelov zelo intenziven in na trgu je veliko število teh (Dubus in Surdryk, 2006). Modeli se bistveno razlikujejo po zmogljivosti simulacij in zanesljivosti rezultatov, ki jih pridobimo z modeliranjem. Kriteriji, ki vplivajo na izbor modela so: dostopnost vhodnih podatkov, časovna zahtevnost, potrebni računalniški sistemi, izkušnje z modeliranjem in namen študije. Dubus s sodelavci je z medsebojno primerjavo različnih modelov ugotovil, da je model, ki bi upošteval vse procese, ki vplivajo na usodo FFS v okolju izven dosega možnega, zato so pri izboru modela potrebni kompromisi (2002). Med dosegljivimi modeli naj bi se odločili za najmanj nepopolen model. Pomembno je, da končni uporabniki hkrati z rezultati modeliranja dobijo tudi informacijo o virih in stopnji (ne)zanesljivosti modeliranja. Pokazalo se je, da je ta informacija med nosilci politik navadno nezaželjena, ker oteži njihovo odločanje, seveda pa je pomembno, da se uporabniki (odločevalci) zavedajo na kako zanesljivih napovedih temeljijo njihove odločitve. Na večjo zanesljivost modeliranja lahko vplivamo z dobrim poznavanjem okolja, to je z zagotavljanjem kvalitetnih vhodnih podatkov (Suhadolc in Lobnik, 2007).

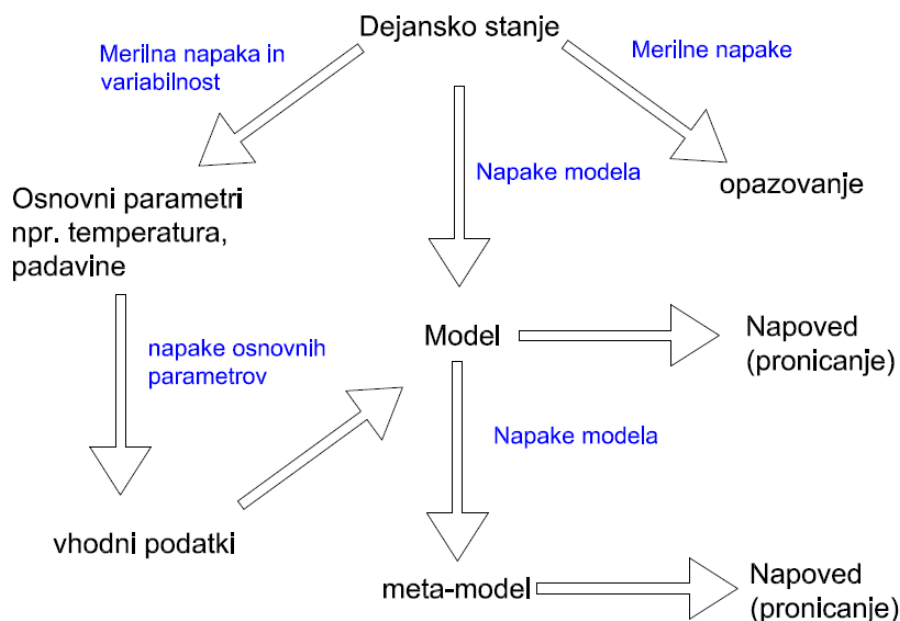
Zahteve po vhodnih podatkih so med modeli različne, v splošnem pa potrebujemo naslednje podatke:

- podnebje (padavine, temperatura in potencialna evapotranspiracija)
- tla (horizonti, globina, organska snov, tekstura, hidrološke karakteristike)

- rastlinski pokrov (datum setve oz. kalitve in žetve, razvojne stopnje rastline)
- fitofarmaceutsko sredstvo (odmerki, sorpcija in razgradnja v tleh)

2.1 VIRI ZA PREDVIDEVANJE NAPAK PRI MODELIRANJU

Napovedovanje izpiranja FFS skozi talni profil je zelo zahtevno zaradi kompleksnosti talnega ekosistema in medsebojne prepletenosti procesov. Za ocenjevanje izpiranja je zato potrebno veliko število vhodnih parametrov, ki pa niso vedno na voljo. Zato se poslužujemo poenostavitve, ki pa ponavadi vodijo do določenih napak v rezultatu. Možne izvore napak pri modeliranju prikazuje slika 1. Model je poenostavljen opis dejanskega stanja, ki opisuje enega ali več pojavov v naravi. Modeli se že po definiciji motijo pri svojem napovedovanju rezultata. Napake se lahko pojavljajo zaradi pomankljive in ne dovolj kakovostne baze vhodnih podatkov. Napake modela (oz. zanesljivost rezultatov modeliranja) lahko ocenimo z neposrednimi meritvami procesa izpiranja (na primer poljski lizimetrski poskusi). Dodatne napake nastanejo tudi zaradi poenostavitve vhodnih podatkov, da namesto nekaterih meritev uporabimo pedotransferne funkcije.



Slika 1: Shematski prikaz virov napak v modelnem napovedovanju (Stenemo, 2007)

Za ocenjevanje izpiranja FFS skozi talni profil in nevarnosti stika s podtalnico uporabljamo tri osnovne pristope: (i) metode na osnovi indeksa oziroma »presejalne« metode, (ii) simulacijski modeli in (iii) meta-modeli (Stenemo, 2007).

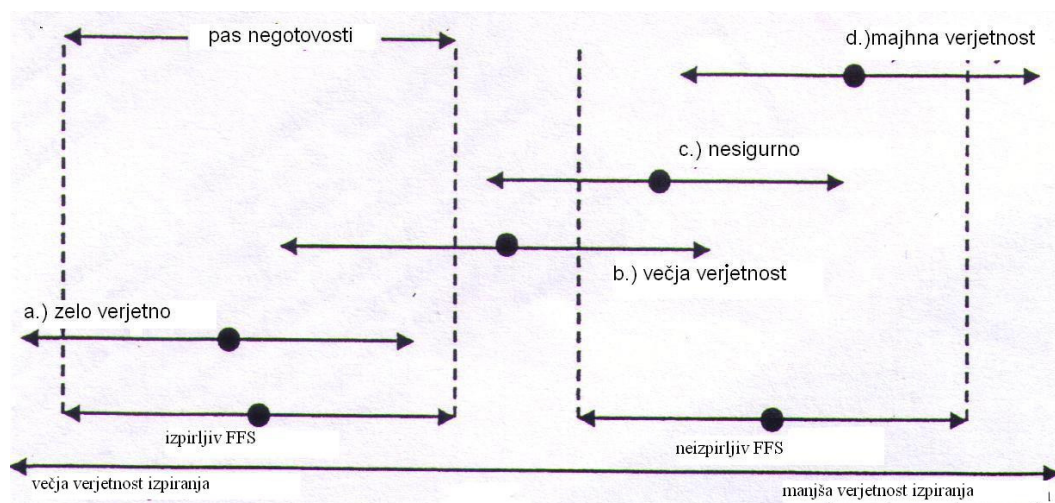
2.2 METODE NA OSNOVI INDEKSA

Metode na osnovi indeksa (»presejalni« pristop) so razvite predvsem za določanje relativne nevarnosti izpiranja FFS v podtalnico. To pomeni, da je rezultat teh metod razredna

lestvica od nenevarnosti izpiranja pa vse do popolne verjetnosti izpiranja. Nekateri indeksni modeli za določanje potenciala izpiranja upoštevajo le lastnosti FFS, drugi pa poleg lastnosti FFS (razpolovno dobo, sorpcijo, hlapnost), upoštevajo tudi lastnosti tal (volumska gostota, vsebnost organske snovi) ter hidrološke lastnosti (zaloga in pretok vode skozi talni profil).

Metode na podlagi indeksa so enostavne metode, ki potrebujejo za določanje nevarnosti izpiranja zelo malo vhodnih podatkov in so zato zelo široko razširjene. Pogosto so ti podatki dostopni iz nacionalnih baz podatkov o tleh, kjer pa so lastnosti tal pogosto zelo skopo opisane. Metode na podlagi indeksa so tudi zato nenatančne in imajo zelo visok faktor odstopanja, oziroma veliko standardno deviacijo.

Kot primer si pogledjmo analizo ranljivosti tal za izpiranje referenčnih FFS v podzemne vode z metodo na osnovi indeksa za enega od otokov Havajskega otočja (sliki 2 in 3).



Slika 2: Shema razvrščanja, ki je bila uporabljena za oceno tveganja izpiranja FFS na območju Havajskega otočja (Stenemo, 2007)

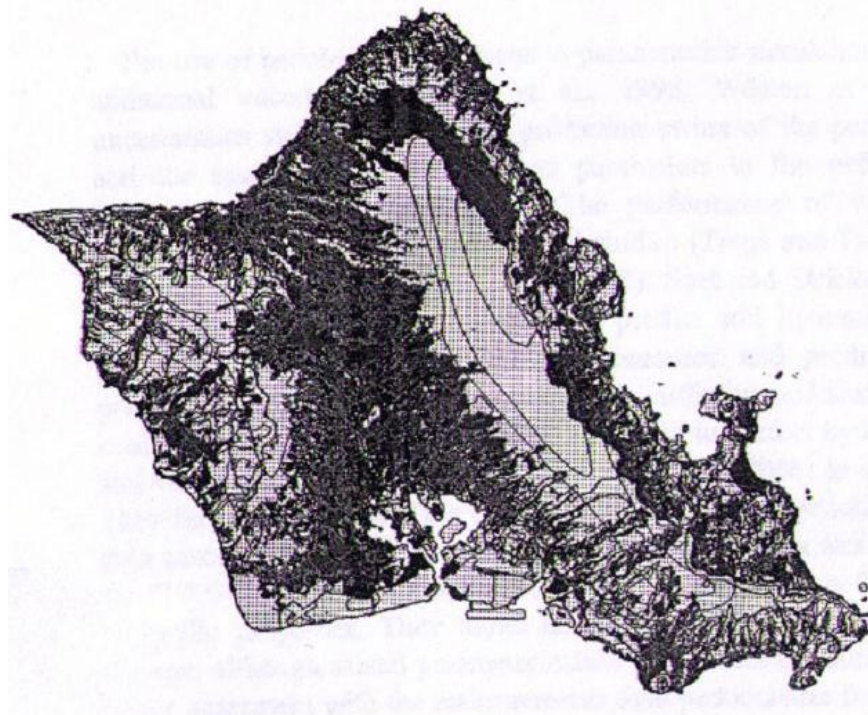
Vsak rezultat, ki je prikazan na sliki 2 kot točka ima določeno standardno deviacijo, ki sega v določeno področje tveganja. Shema je zelo subjektivna, saj so odstopanja ogromna, odločitev o uporabi FFS pa je odvisna predvsem od človeka, ki se subjektivno odloči, največkrat na podlagi stopnje tveganja oziroma ogroženosti človekovega zdravja.

Rezultat a.) lahko ovrednotimo kot veliko tveganje za izpiranje FFS v podzemno vodo. Uporaba tega FFS na obravnavanem območju v obravnavanih količinah je zelo nevarna za človeka, saj predstavlja skoraj popolno verjetnost za stik s podtalnico.

Rezultat b.) kjer standardna deviacija sega v območji gotovega izpiranja in gotovega neizpiranja lahko opišemo kot možnost stika podtalnice s FFS. V primeru, da je FFS zelo nevarno bi na tem področju priporočili prepoved uporabe tega sredstva.

Rezultat c.) kaže na relativno majhno verjetnost za stik FFS s podtalnico. Na tem področju lahko dovolimo uporabo FFS ob dovolj veliki sproti kontroli vsebnosti snovi v tleh.

Rezultat d.) pa nam kaže na zelo majhno verjetnost za stik FFS s podtalnico. Nadzor je seveda potreben vendar v veliko milejši obliki kot pa v primeru c.) saj bi do izpiranja verjetno prišlo le ob močnejših padavinah, spremembi hidroloških lastnosti tal oziroma drugih dejavnikov in sprememb, ki vplivajo na izpiranje snovi v tleh.



Slika 3: Karta ranljivosti tal glede tveganja za izpiranje izbranega FFS na otoku O'ahu (temnejše = manjša verjetnost, svetlejša = večja verjetnost, pikasto = ni podatka) (Stenemo, 2007)

Slika 3 prikazuje stopnje tveganja glede na izpiranje izbranega FFS po celotnem otoku, ozirajoč se na razlike v teksturi tal. Temnejši kot je odtenek na zemljevidu, manjše je tveganje za izpiranje FFS v podtalnico. Zopet se izkaže, da so rezultati tega modela zelo splošni. Opisno ocenjevanje možnosti izpiranja vsebuje velike deviacije, ki so posledica zelo majhnega števila vhodnih podatkov. Odločitev o dovoljenju za uporabo FFS je zelo subjektivne narave in je odvisna od ocenjevalnih kriterijev posameznega ocenjevalca.

V splošnem lahko zaključimo, da je zgoraj opisana metoda nenatančna in so v praksi možna velika odstopanja od ocenjenega stanja. Metoda je primerna za določanje tveganja v območjih o katerih imamo zelo malo pedoloških, geoloških in hidroloških podatkov.

2.3 SIMULACIJSKI MODELI

Do razvoja simulacijskih modelov je vodila želja po poznavanju in napovedovanju izpiranja FFS v podtalnico. Modeli se razlikujejo po svoji kompleksnosti, modelskih predpostavkah in opisu procesov. Ob preizkušanju natančnosti modelov z dejanskimi

poskusi je bilo ugotovljeno, da so najpomembnejši oziroma nujni vhodni podatki hidrološke lastnosti tal, temperatura tal in obnašanje sledilnih substanc. Ugotovljeno je bilo tudi, da simulacijski modeli dokaj dobro popišejo dejansko stanje izpiranja FFS skozi talni profil, če uporabimo ustrezno parametrizacijo. Nadalje ima zelo velik vpliv na validacijo modela modelator zaradi subjektivne izbire parametrov iz poskusov pri validaciji modela (Gottesburen in sod., 2000).

Simulacijski modeli potrebujejo ogromno zbirko vhodnih podatkov o fizikalnih in hidroloških lastnostih tal. Pridobivanje teh podatkov je pogosto zelo drago, nekatere je celo nemogoče pridobiti. Še posebej so zahtevni simulacijski modeli, ki zahtevajo podatke o makropornem toku, ki je parametrizacijsko zelo zahteven proces. Še zahtevnejša je validacija modela s praktičnim eksperimentom. Je časovno in finančno velik zalogaj za raziskovalno ustanovo oziroma urad.

2.3.1 Pedotransferne funkcije

Namesto velike količine vhodnih podatkov za izvajanje simulacij se pogosto uporabljajo pedotransferne funkcije, s katerimi pridobimo podatke o lastnostih tal, ki jih je težko meriti ali nam niso na voljo. Pedotransferna funkcija je statistična zveza med dvema ali več enostavno merljivimi lastnostmi tal in parametrom modela. Največ truda je bilo do sedaj vložena v pedotransferno funkcijo zadrževanja vode v tleh, veliko manj pa v funkcijo hidravlične prevodnosti. Z uporabo pedotransferne funkcije se v rezultatih pojavi dodatna napaka, ki je seveda odvisna od števila parametrov upoštevanih v funkciji. Vendar pa je razmerje med finančnim vložkom in natančnostjo rezultata ugodno za uporabo pedotransfernih funkcij v simulacijah izpiranja FFS v tla.

2.3.2 Poznani simulacijski modeli

Med najbolj poznanimi simulacijskimi modeli so: PRZM, PELMO, GLEAMS, PESTLA, VARLEACH, LEACHM, MACRO, PLM in PEARL, med katerimi se v EU za registracijske postopke uporabljajo štirje modeli, ki se stalno nadgrajujejo. Za ocenjevanje oz. napovedovanje izpiranja FFS se uporabljajo MACRO, PEARL in PELMO, za izračun površinskega odtoka pa PRZM.

V primeru, da rezultate različnih modelov medsebojno primerjamo, je za zmanjšanje relativne napake in subjektivne ocene osebe, ki simulacijo izvaja, pomembno, da so vhodni podatki (podnebje, tla, hidrologija, vegetacija) merjeni oz. izračunani na enak način. To še posebno velja za registracijske postopke FFS. Pri izdelavi ocen tveganja za namen registracije FFS so tako v uporabi enotni standardni scenariji, trenutno 9 FOCUS lokacij (preglednica 3).

Preglednica 3: Vhodni podatki za modeliranje – standardni FOCUS scenariji
(Azimonti, 2006)

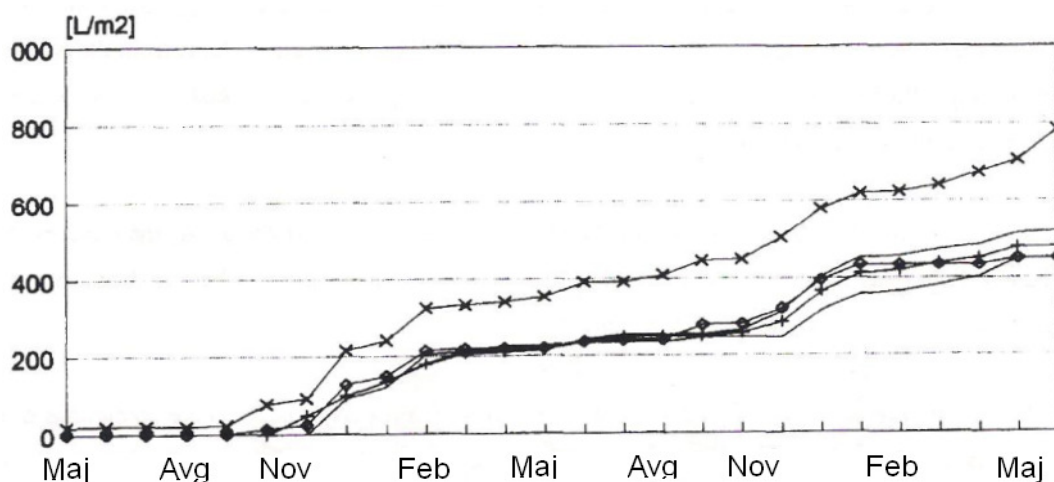
Lokacija	Povprečna letna temperatura(°C)	Padavine (mm)	Tekstura tal	Delež organske snovi (%)
Chateaudun	11,4	648	meljasto glinasta ilovica	2,4
Hamburgh	9,2	786	peščena ilovica	2,6
Jokioinen	4,3	638	ilovnat pesek	7,0
Kremsmunster	8,8	900	ilovica/meljasta ilovica	3,6
Okehampton	10,4	1038	ilovica	3,8
Piacenza	13,3	857	ilovica	1,7
Porto	14,8	1150	ilovica	6,6
Sevilla	18,1	493	meljasta ilovica	1,6
Thiva	16,2	500	ilovica	1,3

2.3.3 Model PELMO za ocenjevanje izpiranja FFS

Model PELMO se uporablja za napoved izpiranja FFS v nenasičenem delu tal in računa koncentracijo izpranih snovi v odcedni vodi na dnu tal. Neposredna primerjava med napovedano koncentracijo, ki z odcedno vodo vstopa v vodno telo, in izmerjeno koncentracijo na zajetjih ni mogoča, ker model ne upošteva redčenja v podtalnici in nadaljnjih transformacij (Persolja, 2008). Vendar pa model vseeno pokaže kakšne koncentracije izpranega FFS se izperejo na dno talnega profila. Večje koncentracije kot so na dnu, večja je možnost, da pride do onesnaženja podtalnice.

Model PELMO zahteva kakovostne podatke za izdelavo scenarijev za modeliranje. Odstopanja vnesenih podatkov območja se lahko odrazijo z nenatančnimi in zavajajočimi rezultati modeliranja. Kakovostni podatki so zato pogoj za pridobitev realnih rezultatov o ranljivosti tal.

Model PELMO je bil validiran v poljskih lizimetrovskih poskusih (Klein s sod., 1997). Primerjava med modeli PRZM-1, PELMO 1,5 in PELMO 2,0 pokaže, da je najnovejši model PELMO 2,0 najnatančneje napovedal količino vode na dnu profilov (slika 4). V nekaterih mesecih se napoved in dejanska izmerjena vrednost celo pokrivata.



Legenda:

— izmerjene vrednosti x-x PRZM-1
 ●-● PELMO 1,5 + + PELMO 2,0

Slika 4: Primerjava merjenih (lizimetri) in izračunanih (PELMO) kumulativnih količin izprane vode skozi talni profil (L/m^2) (Klein in sod., 1997: 2578).

Z modelom PELMO so bile izdelane prve ocene izpiranja za izbrane FFS v slovenskem prostoru (Knapič in Simončič, 2007; Peršolja, 2008; Štangelj, 2009).

2.3.4 Model MACRO za ocenjevanje izpiranja FFS

Drugi od znanih simulacijskih modelov, ki si ga bomo malce natančneje ogledali se imenuje MACRO model. Razvit in uporabljen je bil za ocenjevanje izpiranja FFS v podtalnico Švedskem (Stenemo, 2007).

MACRO model je enodimenzionalen, ki upošteva »dvojno« prepustnost tal za določanje usode FFS, saj upošteva tudi preferenčni tok vode skozi makropore. Tok in transport snovi sta simulirana v dveh regijah, mikroporni in makroporni tok. Izmenjava snovi med mikro- in makroporami je vodena na osnovi najpomembnejšega parametra v tem modelu, t.j. efektivne difuzne poti, ki v največji meri vpliva na makroporni tok, skupaj z hidravlično prevodnostjo tal. Difuzno dolžino poti lahko smatramo kot nadomestni parameter strukture tal. Tok vode skozi mikropore izračunamo z uporabo Richardove enačbe, pri čemer je prenos topljenca opisan z adveksijsko-disperzijsko enačbo, transport vode pa je smatran kot gravitacijski tok (Stenemo, 2007). Vodno-zadrževalne lastnosti tal so v modelu opisane z modificirano obliko van Genuchten enačbe, hidravlična prevodnost pa z uporabo Mualem modela (Mualem, 1976).

Model predpostavlja, da razgradnja FFS poteka po kinetiki prvega reda, ter upošteva vpliv temperature in vlage tal na hitrost razgradnje. Upošteva sorpcijo FFS na talne delce z Freundlichovimi koeficienti. Model uporabniku omogoča upoštevanje namakanja tal,

medtem ko izhlapevanje v tem modelu ni simulirano, ker ga lahko upoštevamo z zmanjšanim odmerkom FFS. Kot vhodni parameter lahko opišemo tudi vrsto pridelka, za katerih boljše uspevanje se FFS uporablja. Za parametrizacijo modela se uporablja kombinacija pedotransfernih funkcij ter vrednosti ostalih spremenljivk za najslabši možen scenarij (Woersten in sod., 1998).

2.3.5 Prednosti in slabosti simulacijskih modelov

Glavna prednost simulacijskih modelov za ocenjevanje izpiranja FFS skozi talni profil je upoštevanje vseh bistvenih procesov v usodi FFS. Simulacijski modeli so nadalje fleksibilni in jih lahko prilagodimo posameznemu območju na podlagi lastnosti tal, hidrološke situacije, podnebnih razmer in rabe tal. Lahko jih uporabljamo tudi kot ocenjevanje možnih omilitvenih ukrepov za zmanjševanje izpiranja FFS.

Glavna omejitev simulacijskih modelov v kontekstu ocenjevanja ranljivosti podtalnic je njihova zahtevnost po vhodnih podatkih. Na primer, meritve za pridobitev podatkov o talnih lastnostih, ki so potrebni za parametrizacijo MACRO modela, so časovno zahtevne in drage. Zato se natančni simulacijski modeli v splošnem v praksi ne uporabljajo za rutinske izdelave kart ranljivosti, razen kadar se odločimo za modeliranje omejenega števila fiksnih ali najslabših možnih scenarijev (*worst-case*).

2.4 META-MODELI

Pojem »meta-modeli« se uporablja za označevanje poenostavljenih simulacijskih modelov, ki skozi statistično ocenjevanje izločajo nepotrebne, podrobne podatke ter analizirajo približke izhodnih rezultatov. Poenostavitve dosežene z meta-modeliranjem nam omogočajo ocenjevanje učinkov alternativnih regionalnih ali krajevno specifičnih politik (ukrepov) brez potrebe po dodatnih simulacijah. Meta-model se lahko oblikuje z uporabo različnih metod, na primer (i) linearno ali nelinearno regresijo, (ii) umetnimi nevronske mrežami, (iii) »look up« tabelami. Meta-modeli so posebno uporabni v kontekstu uporabe na večjih območjih, ker združujejo enostavnost metod na osnovi indeksa in pomembne elemente dinamičnih procesov v tleh, ki jih vključujejo simulacijski modeli (Stenemo, 2007). Več meta-modelov je nastalo iz osnovnih simulacijskih modelov, na primer MACRO (metamodel MACRO, FITOMARCHE, FOOTPRINT), PEARL (GeoPEARL) in PELMO (MCPELMO), PRZM (FOOTPRINT).

Baze podatkov potrebne za meta-modeliranje so v splošnem manj zahtevne, rezultate pa dobimo v krajšem času. Meta-modele lahko združujemo z geografskimi informacijskimi sistemi in s tem pri izdelavi ocen izpiranja uporabimo dodatne baze podatkov: nacionalne baze podatkov o tleh, geološke in hidrološke karte, globino podtalnic, pokrovnost in raba tal, uporaba FFS. Rezultate, pridobljene z meta modeli, je zato lažje vključevati v večje sisteme za podporo odločanja politikam (Suhadolc in Lobnik, 2007).

2.4.1 MACRO

Eden izmed prvih metamodelov, ki je zasnovan na MACRO modelu je bil razvit z namenom podpore odločevalcem na lokalni ravni na Švedskem, ki ocenjujejo potencialno stopnjo tveganja za izpiranje FFS v podtalnice. Orodje sestoji iz poenostavljenega uporabniškega vmesnika modela MACRO, ki vodi uporabnika skozi nastavitve. Glavni namen snovalcev orodja je bil poenostavitev orodja do te mere, da so potrebni vhodni podatki lahko dostopni za uporabnika (tekstura tal, vsebnost organske snovi tal). Cilj je bil, da uporabnik orodja ne bi potreboval posebne znanja o samem simulacijskem modelu.

2.4.2 FOOTPRINT

FOOTPRINT je akronim za funkcionalna orodja za ugotavljanje tveganja in upravljanje s FFS v okolju: »*Functional tools for pesticide risk assessment and management*«. Je eden zadnjih in najobetavnejših pristopov na tem področju. Set treh Footprintovih računalniških orodij je namenjen trem različnim končnim skupinam uporabnikov: (i) kmetom in svetovalni službi na nivoju kmetije (FOOT – FS), (ii) upravljalcem voda na nivoju vodozbirnih območji (FOOT – CRS) in (iii) ustvarjalcem politik/strokovnjakom registracijskih postopkov na državnem in/ali EU nivoju (Suhadolc in Lobnik, 2007).

FOOTPRINT za ocenjevanje izpiranja FFS v podtalnico uporablja najnovejšo verzijo modela MACRO, ki upošteva tudi preferenčni tok vode skozi makropore. Model MACRO je razvil Nick Jarvis na Švedskem. MACRO simulira prenos skozi peščena tla, kjer so tokovi pretežno matrični do najtežjih glinenih tal, kjer prevladuje površinski odtok. Za ocenjevanje površinskega odtoka in erozijo pa se znotraj FOOTPRINTA uporablja model PRZM. Model je razvila USEPA, prav tako kot MACRO pa uporablja za ocenjevanje in registracijo FFS že preizkušene metode.

FOOTPRINT za izvajanje modelov MACRO in PRZM zajema podatke iz okoljskih scenarijev (podnebje, tla, rastlinske kulture) in informacije o FFS (DT50 in Koc). Vendar pa se pojavi ključni problem pri zagotavljanju predvidevanja vseh možnih kombinacij in scenarijev, ki so možne v evropskem prostoru (znotraj EU). Poznamo približno 70.000 različnih kmetijsko-okoljskih scenarijev, približno 100 vrst FFS in približno 10 različnih načinov uporabe FFS. Kombinacije teh vhodnih podatkov zahtevajo približno 70 milijonov simulacij modela, za kar se ocenjuje 180 let računanja z osebnim računalnikom. Pa vendar je pomembna novost FOOTPRINTovega pristopa dejansko izračunati vse možne kombinacije v naprej in tako omogočiti končnemu uporabniku hitro pot do potrebne informacije (v nekaj minutah, namesto v nekaj urah ali dneh). Kot možne rešitve tega problema so:

- povečanje učinkovitosti MACRO modela,
- povečanje hitrosti delovanja računalnikov (uporaba linux programske opreme, in uporaba superračunalnikov),
- mobilizacija velikega števila računalnikov (koncept FOOTPRINT).

Rezultat mnogoterne ponavljanja modelov je ogromna baza podatkov (»look-up« table), ki se uporablja za iskanje v naprej izračunanih rezultatov modela na podlagi različnih

vhodnih podatkov. Torej v principu podatkovna mreža, vgrajena v uporabniku prijazno orodje (program), nadomešča direktno delo s simulacijskim modelom, za določanje prenosa FFS v tleh.

Številčnost različnih kmetijskih okoljskih scenarijev je eden največjih doprinosov omenjenega projekta, kajti v sedanjih registracijskih postopkih EU lahko izbiramo le med devetimi tako imenovanimi FOCUS modeli, med katerimi pa ni slovenskega.

Informacija o tveganju rabe FFS na določenem območju s specifičnimi okoljskimi razmerami (tla, podnebje) je predpogoj za zmanjševanje morebitnih negativnih vplivov uporabe FFS v okolju.

3 ZAKLJUČEK

Uporaba FFS in njihovi potencialno negativni učinki na okolje so dandanes zelo odmevni. Vendar si tako masovne pridelave kmetijskih rastlin ne moremo predstavljati brez uporabe FFS, zato je potrebno več pozornosti nameniti obvladovanju oziroma nadzоровanju rabe FFS. Z uporabo primernih orodij lahko v modelih predvidimo in optimiziramo vpliv rabe FFS na način, da so nezaželjene posledice za okolje kar najmanjše. Računalniška orodja nam torej omogočajo hitro in enostavno pot do identifikacije glavnih poti in virov onesnaženja s FFS, ocene vsebnosti FFS v podtalnici in površinskih vodah, ter ocene kako, bi izvajanje omilitvenih strategij lahko zmanjšalo onesnaženje s FFS v preučevanih okoljih. Izbira modelov je v veliki meri odvisna od namena ocenjevanja. Največkrat se ocenjuje stopnja tveganja ali pa najslabši možen scenarij.

4 VIRI

- Azimonti G. 2006. State-of-the-art review on approaches to environmental risk assessment for pesticides. Report DL3 of the FP6 EU funded FOOTPRINT project. Pinole, ICPS: 45 str.
- Dubus I.G., Surdyk N. 2006. State-of-the-art review on pesticide fate models and environmental indicators. Report DL#4 of the FP6 EU –funded FOOTPRINT project. Orléans Cedex, BRGM: 39 str.
- Gottesburen B., Aden K., Barlund I., Brown C., Dust M., Gorlitz G., Jarvis N., Rekolainen S., Schafer H. 2000. Comparison of pesticide leaching models: results using the Weiherbach data set. *Agricultural Water Management*, 44: 153-181
- Jarvis N.J. 1995. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*, 59 :27-34
- Kladivko E.J., Van Scoyoc G.E., Monke E.J., Oates K.M., Pask W. 1991. Pesticide and nutrient movement into subsurface tile drains on a silt loam soil in Indiana. *Journal of Environmental Quality*, 20: 264-270
- Klein M., Mueller M., Dust M., Goerlitz G., Gottesburen B., Hassink J., Kloskowski R., Kubiak R., Ressler H., Schafer H., Stein B., Vereecken H. 1997. Validation of the pesticide leaching model PELMO using lysimeter studies performed for registration. *Chemosphere*, 35, 11: 2563-2587
- Knapič M., Simončič A. 2007. Primerjava ocen izpiranja izbranih fitofarmaceutskih sredstev s FOCUS modeloma PELMO in PEARL na srednje globokih, evtričnih, rjavih tleh v Savinjski dolini. Ljubljana, Kmetijski inštitut Slovenije: 55-61 str.
- Leonard R.A. 1990. Movement of pesticides into surface waters. In: Cheng H.H. (ed.): *Pesticides in the soil environment: processes, impact, and modeling*. SSSA book series No. 2, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA: 303 -349
- Milevoj L. 2007. *Kmetijska entomologija (splošni del)*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 179 str.
- Mualem Y. 1976. A new model of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513-522
- Persolja J. 2008. *Napoved izpiranja herbicidov v tleh Dravskega in Ptujkega polja z modelom PELMO: magistrsko delo*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta: 40 str.
- Reichenberger S., Bach M., Skitschak A., Frede H.G. 2006. State-of-the-art review on mitigation strategies and their effectiveness. Report DL#7 of the FP6 EU-funded FOOTPRINT project. Giessen, University Giessen: 76 str.

Stenemo F. 2007. Vulnerability assessments of pesticide leaching to groundwater. Uppsala, Swedisch University of Agricultural Sciences: 39 str.

Suhadolc M., Lobnik F. 2007. Ugotavljanje tveganja in upravljanja s fitofarmaceutskimi sredstvi v okolju-predlog novih pristopov v Sloveniji na osnovi sodelovanja v EU projektu FOOTPRINT. V: Zbornik predavanj in referatov 8., slovenskega posvetovanja o varstvu rastlin. Maček J. (ur.). Ljubljana, Društvo za varstvo rastlin Slovenije: 7-10

Štangelj A. 2009. Ocena izpiranja izbranih herbicidov na obrečnih tleh Apaške doline, posejanih s koruzo: diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 40 str.

Woersten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C. 1998. Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Wageningen, Winang starting centre
http://eurosoils.jrc.ec.europa.eu/esdb-ardive/eurosoils_docs/other/Hypres.pdf
(maj, 2010)

Assessing soil contamination: A reference manual. 2000.
<http://www.fao.org/DOCREP/003/X2570E/X2570E06.htm>
(september, 2010)

ZAHVALA

Mentorici doc. dr. Marjetki Suhadolc se prisrčno zahvaljujem za čas in pomoč pri pripravi in izdelavi diplomskega projekta. Hvala za vso literaturo, podrobno branje in nasvete.

Recenzentu prof. dr. Franciju Acu Celarju se zahvaljujem za hitro in korektno branje projekta ter ustrezne dopolnitve.

Hvala mojim sošolcem, ki so mi posredovali svoje izkušnje in pomagali po svojih močeh.

Posebno sem hvaležna svojim staršem in fantu za moralno pomoč, s čimer so mi znatno olajšali dosedanji študij. Cenim vaše razumevanje in podporo pri mojih odločitvah.